

제주도 한라산 고지대의 다중 화산분화 기록: 용암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대

고기원^{1,4} · 박준범^{2,*} · 홍세선³ · 고인종⁴ · 김태형¹

¹제주특별자치도개발공사

²미육군극동공병단

³한국지질자원연구원

⁴제주권 국토교통기술 지역거점센터

요 약

우리는 제주도 한라산 국립공원내에서 채취한 20개 화산암류 시료의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료를 통해 한라산 고지대의 화산활동사를 새롭게 제시한다. 단계별 가열에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 플래토 스펙트럼으로부터 화산암의 전암 석기 및 반정 결정(사장석 및 알칼리장석)에 대해 신뢰할 만한 연대를 얻었다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 의하면 한라산 고지대의 화산활동은 약 17만 년 동안 지속되어왔으며 크게 2회의 화산활동기, 즉 18.2~10만 년 전과 9.5~1.4만 년 전으로 구분된다. 백록담 조면암은 석기 부분의 심한 풍화로 인해 전암 연대를 얻는데 실패하였으나, 알칼리장석 반정 결정으로부터 50.1±6.2 ka의 연대(완전용융)를 보고한다. 백록담 동릉 정상부에 분포하는 현무암질 조면안산암 조성의 용암류로부터 얻어진 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 17.7±2.7 ka와 16.2±3.9 ka은 한라산 지역에 분포하는 용암류 중 가장 젊은 연대이다. 따라서 한라산 정상부의 분화구로부터 동쪽으로 용암류의 용출을 일으킨 최후 화산활동은 약 2만 년 전에서 약 1만 4천 년 전 사이에 있었을 것으로 해석된다. 향후 한라산에 분포하는 용암류의 층서에 대한 기존의 연구 결과는 재고되어야 하며, 한라산의 화산활동을 자세히 밝히기 위해 심부 시추를 포함한 많은 연구가 실행되어야 한다.

주요어: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 화산활동, 한라산, 제주도

Gi Won Koh, Jun Beom Park, Sei Sun Hong, In Jong Ko and Tae Hyong Kim, 2019, Multiple volcanic eruption episodes in the highlands of Mt. Halla (Hallasan), Jeju Island, Korea: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of lava flows. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 71-86

ABSTRACT: We present $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar age of 20 volcanic rocks from National Park of Mt. Halla (Hallasan) in an attempt to understand the volcanism of highlands of volcano. We report reliable absolute ages of whole rock (groundmass) and feldspar phenocrysts based on concordant plateau and isochron ages by incremental heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method. The volcanism of the highlands of Mt. Halla has lasted for approximately 170,000 years and is divided into two major volcanic episodes, 0.182~0.100 Ma and 0.095~0.014 Ma. Although we failed to get the whole rock age from Baengrokdam trachyte due to severe weathering, 50.1±6.2 ka (total fusion age) from anorthoclase phenocrysts is reported. The youngest ages, 17.7±2.7 ka and 16.2±3.9 ka from the topmost lava flow with basaltic trachyandesite composition covering the eastern part of Baengrokdam imply that the last episode of lava effusion from the summit crater may have occurred between ca. 20 ka and ca. 14 ka. In the future, the existing volcano stratigraphy of Mt. Halla should be revised and additional research including deep drilling should be performed to understand the volcanism of Mt. Halla in detail.

Key words: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar age, volcanism, Mt. Halla (Hallasan), Jeju Island

(Gi Won Koh and Tae Hyong Kim, Water Resources R&D Center, Jeju Special Self-Governing Province Developing Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea; Jun Beom Park, US Army Corps of Engineers Far East District, Republic of Korea; Sei Sun Hong, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Gi Won Koh and In Jong Ko, Jeju Regional Infrastructure Technology Development Center, Jeju Special Self-Governing Province Developing Corporation, Jeju 63345, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-503-321-6126, E-mail: chunpom@empas.com

1. 서 언

제주도의 광역 지질과 화산활동에 대한 공금증은 2010년 이후 상당한 숫자의 연대측정 자료를 포함한 일련의 연구를 통해 많은 부분 해결되고 있는 중이다 (e.g., Brenna *et al.*, 2011, 2012a, 2012b, 2015; Koh *et al.*, 2013). 그러나 한라산 국립공원내 백록담 주변을 포함한 고지대의 지질 연구는 야외조사를 수행하기 위한 출입허가취득 및 접근이 어렵고 조릿대의 광범위한 분포로 인한 노두 확인은 물론 용암류 간 선후관계의 해석이 곤란하며, 항공 및 위성 사진 해석도 식생 피복으로 인해 방해를 받는 등 여러가지 한계로 인해 비교적 더디게 진행되고 있다.

한라산 일대의 지질은 서귀포-하효리 도폭(Park *et al.*, 2000) 연구로부터 지질 분포 및 층서가 제시된 바 있으며, 이후 Koh *et al.* (2003)과 Yoon *et al.* (2005)에 의해 연구가 수행되었다. 이들의 연구는 절대연대측정은 이루어지지 않았으며, 접근 가능한 지역의 용암류와 퇴적암류의 지질 기재를 통해 화산층서를 설정하였다.

해발 700 m이상의 한라산 국립공원내에는 백록담 북-서-남벽을 포함한 한라산체(백록담, 해발 1950 m), 골머리오름(해발 848.4 m), 성널오름(해발 1215.2 m), 돌오름(해발 1278.5 m), 작은두레왓기암-큰드레왓(해발 1623.4 m), 영실(영실기암-병풍바위, 해발 1639.3 m), 왕관릉(해발 1666.3 m), 삼각봉(해발 1695.5 m), 윗세오름(해발 1749 m), 장구목(해발 1813 m), 산별른내(해발1000-900 m) 등지에 조면암이 분포한다(ERI, 2009). 그러나 이들 조면암체들은 각각 독립적인 분포를 하고 있고 암석학적 특징이 서로 다름에도 불구하고 “한라산조면암(Park *et al.*, 2000; Koh *et al.*, 2003; Yoon *et al.*, 2005)”의 단일 층서로 설정되어 동일 시기의 화산활동에 의해 만들어진 산물로 해석되었다.

한편, 백록담 일대에 분포하는 용암류의 기존 연대 자료는 두개의 용암류에 대해 보고되었다. 백록담 서쪽 능선의 조면암은 K-Ar 전암 연대로 각각 0.025 ± 0.008 Ma (Won *et al.*, 1986)와 0.07 ± 0.01 Ma (Tamanyu, 1990)로 보고되었고, 백록담 동쪽 능선의 현무암질 용암류는 K-Ar 전암 연대로 0.47 ± 0.07 Ma



Fig. 1. Field photograph of Yongjingak valley with (a) peak of Mt. Halla, (b) Wanggwangreung taken from Samgakbong. Several small photos show field activities and tephra layers.

(Tamanyu, 1990), Ar-Ar 전암 연대로 0.35 ± 2.3 ka (Park *et al.*, 2000)가 보고된 바 있다. 그러나 백록담 동쪽 능선의 현무암질 용암류의 경우 반정 광물이 지니고 있는 과잉 아르곤(excess argon)으로 인해 원래 연대보다 오래된 연대를 지시한다(Tamanyu, 1990). 이외에도, 서귀포-하효리 도폭(Park *et al.*, 2000) 연구에서도 여러 지점의 시료에 대한 연대측정이 이루어졌으나 오차범위가 너무 커서 신뢰하기가 곤란하다. 이처럼 이전에 수행된 연대측정 연구 결과는 동일 용암류임에도 연구자 혹은 분석법에 따라 상당한 연대 차이를 보인다. 그럼에도 불구하고, 그동안 한라산 백록담은 약 2만 5천 년 전의 화산활동으로 만들어졌다는 것(Won *et al.*, 1986)이 정설화되어왔다.

Koh *et al.* (2013)은 한라산조면암에 해당하는 어리목 상류 Y계곡에 분포하는 조면암(YVA)으로 부터 Ar-Ar 전암 연대, 171 ± 11 ka를 보고하고, 한라산에 분포하는 조면암류가 각각 다른 시기의 화산활동 산물일 가능성을 제기한 바 있다. 최근, Ahn and Hong (2017)은 한라산 정상부의 용암류 및 화산쇄설층 하부에 분포하는 퇴적층에서 채취한 석영 결정의 광여기루미네선스 연대 분석으로 $21 \pm 4 \sim 23 \pm 4$ ka, $37.6 \pm 3.2 \sim 41.3 \pm 3.1$ ka의 연대를 제시하고, 백록담 분화구는 약 37 ka 전후 조면암돔 분출 이후, 약 20 ka 전후 조면현무암질 용암류의 분출로 형성되었다고 제시한 바 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 한라산 고지대를 대상으로 이전에 수행된 연구들은 몇 개의 특정 용암류 또는 지점을 대상으로 수행되었을 뿐 아니라, 연대측정 결과도 서로 너무 큰 차이를 나타내고 있어 조면암류를 포함한 한라산 고지대의 지질 발달사를 정립하기에는 미흡한 실정이다. 따라서, 백록담을 중심으로 용진각, 방아오름, 영실을 포함하는 정상부 지역에 분포하는 용암류에 대한 연대 자료를 기반으로 지질현상 해석과 화산층서 설정 연구의 필요성이 대두되었다.

일반적으로 화산체의 중심 화산활동 중 중성-산성 마그마의 돔상 분출(관입상을 포함)은 화산체의 부피를 상당히 증가시키고 이로 인해 부분적으로 용기되거나 부풀어지기도 하며, 때로는 커다란 틈새(fracture)가 생겨 화산체의 일부분이 갈라지기도 할 뿐만 아니라, 돔의 정치(emplacment) 후 냉각 단계 동안 갑작스런 붕괴로 인해 화산재해를 야기하기

도 한다(Barmin *et al.*, 2002; Gertisser *et al.*, 2012; van Wyke de Varries *et al.*, 2014; Ogburn *et al.*, 2015; Ashwell *et al.*, 2018). 한편, 틈새 혹은 돔의 붕괴로 인해 화산체가 갈라져 노출된 부분은 지속적인 화산활동의 산물로 덮혀져 알수 없었던 이전 화산활동에 대한 중요한 정보를 제공해주는데, 한라산 북쪽 무수천 및 한천의 최상류 계곡 등은 한라산체의 고기 화산활동 정보를 획득하기에 최적의 장소라 여겨져 왔다.

이 연구는 2016년과 2017년 한라산 지역의 관음사, 영실, 돈네코 탐방로 주변 하천 계곡, 장구목 정상 일대 및 한천의 최상류인 용진각 계곡(그림 1) 등지의 지질조사 중 채취한 20개의 용암류 시료(그림 2)에 대해 전암주성분자료를 포함한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 보고한다. 또한, 본 연구결과와 기존 자료의 통합 해석을 통해 한라산 고지대의 화산활동 양상에 대한 새로운 모델을 제안한다.

2. 분석 방법

미국 오레곤 주립대학교 Argon Geochronology Lab에서 전암 주성분원소의 화학분석은 X선 형광 분석법으로, 전암(석기) 및 조암광물(사장석 혹은 알칼리장석)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 ARGUS VI 모델(Thermo Scientific)의 다검출기 불활성기체 질량 분석기로 이루어졌으며, ArArCALC v2.7.0 (beta version) 전산프로그램(Koppers, 2002)으로 절대연대가 계산되었다. 자세한 시료 준비, 장비 및 분석 방법은 다음의 웹사이트를 참조바란다(<http://geochronology.coas.oregonstate.edu/>).

3. 결 과

표 1은 분석대상 시료의 위치 정보를 나타내며, 표 2와 표 3은 각 시료의 전암 주성분 자료 및 전암(석기)과 장석류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 정리한 것이다. 암석의 명명은 IUGS의 전암 이산화규소(SiO_2) 대 알칼리($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 함량 분류도(Le Maitre *et al.*, 2002)에 적용하였다(그림 3). 이때 철 성분의 총 함량(FeO^t)은 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 비가 0.3 (Middlemost, 1989)이 되도록 Fe_2O_3 와 FeO 값을 재계산하여 다른 산화물의 값과 합한 후 물이 없는 상태의 백분율로 재계

산되었다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 자료(표 3)는 플래토(plateau) 연대, 정등시선(normal isochron) 연대,

역등시선(inverse isochron) 연대를 제공하고 있지만, 해석에서는 과잉 아르곤의 영향을 배제할 수 있

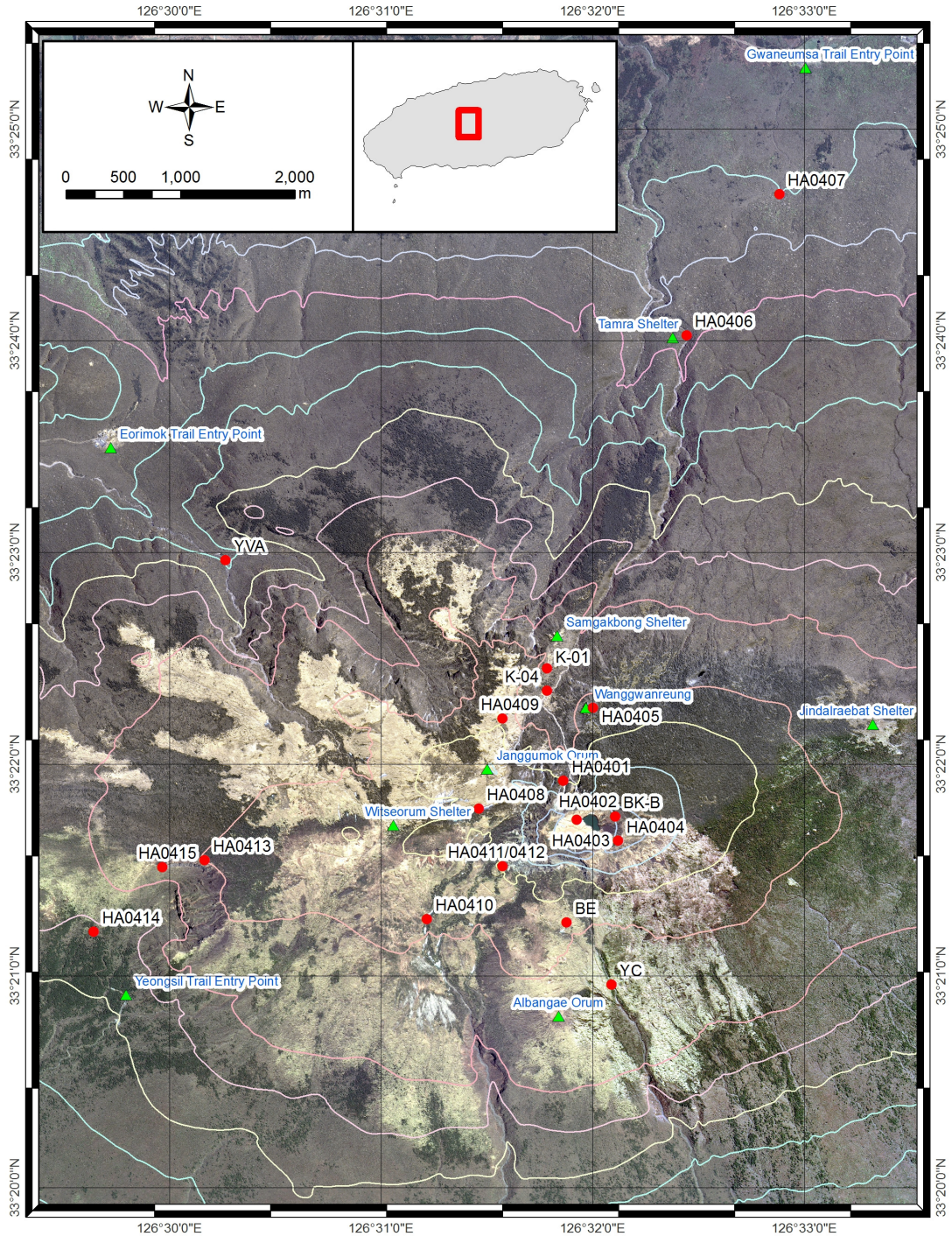


Fig. 2. Map of sample locations in Mt. Halla, Jeju Island (contour interval in 100 m).

Table 1. Sample locations of volcanic rocks at the studied area, Mt. Halla, Jeju Island.

ID	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Elevation (m)*
BE	33.354189	126.531267	1642
BK-B	33.362533	126.535111	1891
HA0401	33.365350	126.531028	1716
HA0402	33.365350	126.531028	1716
HA0403	33.362278	126.532078	1854
HA0404	33.360614	126.535356	1901
HA0405	33.371081	126.533386	1630
HA0406	33.400423	126.540745	872
HA0407	33.411525	126.548053	714
HA0408	33.363133	126.524364	1728
HA0409	33.370253	126.526250	1672
HA0410	33.354461	126.520285	1614
HA0411	33.358624	126.526247	1720
HA0412	same as HA0411		
HA0413	33.359097	126.502775	1602
HA0414	33.353472	126.494033	1299
HA0415	33.358783	126.499503	1500
K-01	33.374197	126.529756	1536
K-04	33.372422	126.529756	1500
YC	33.349300	126.534833	1532
YVA**	33.382700	126.504422	1115

*Elevation (Mean Sea Level) readings from Google Earth Pro

**Data from Koh *et al.* (2013)

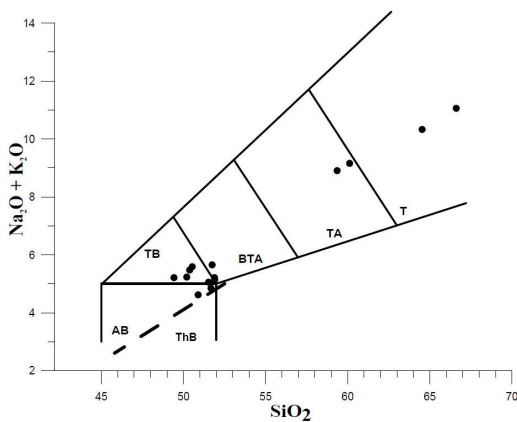


Fig. 3. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})(\text{wt}\%)$ vs. $\text{SiO}_2(\text{wt}\%)$ plot of the volcanic rocks from Mt. Halla, Jeju Island. The fields show rock nomenclature schemes of Le Maitre *et al.* (2002) with thick dashed line from Macdonald and Katura (1964), dividing alkalic rocks from sub-alkalic rocks.

는 연대인 플래토 연대를 이용하였다. 그림 4와 5는 단계별 가열(incremental heating)에 따른 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대 연대 스펙트럼으로부터 얻어진 시료별 플래토 연대를 나타낸다. 단, 백록담 조면암내 알칼리장석의 경우는 연대가능성 확률 분포를 도식적으로 표현한 그림을 추가적으로 제시한다(그림 5). 각 시료의 기재적 특징을 다음과 같다.

HA0407(해발 714 m): 관음사 탐방로에서 탐라대 피소 방향으로 약 1.5 km지점에 분포하는 파호이호 용암류로서 다공질의 복합 용암류의 특징을 지닌다. 감람석과 사장석이 입간상 조직을 이룬다. SiO_2 51.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.6 wt%로 현무암질 조면안산암에 해당한다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 23.5 ± 2.2 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 백록담조면현무암으로 기재된 바 있으나, 암석 기재적 특징 및 연대 측면에서 백록담 동릉

Table 2. Major element abundances of volcanic rocks at the studied area, Mt. Halla, Jeju Island.

ID	HA0407	HA0406	K-01	HA0401	HA0402	HA0403	HA0404
Rock Name	BTA	TB	T	TB	TA	T	BTA
SiO ₂	51.59	50.17	64.01	49.67	59.48	66.34	51.67
TiO ₂	2.50	2.59	0.39	2.31	1.08	0.27	2.43
Al ₂ O ₃	16.01	18.71	17.43	17.78	16.70	15.74	15.60
MgO	4.18	3.55	0.32	4.46	1.30	0.11	4.72
FeO [†]	10.66	9.62	4.36	9.71	7.04	4.60	10.92
MnO	0.16	0.13	0.10	0.13	0.12	0.14	0.16
CaO	8.15	8.63	2.10	7.86	3.48	1.24	8.16
Na ₂ O	3.85	3.86	5.79	3.79	5.26	5.71	3.67
K ₂ O	1.79	1.59	4.45	1.71	3.80	5.30	1.52
P ₂ O ₅	0.55	0.51	0.12	0.63	0.50	0.04	0.46
LOI	0.00	0.00	0.23	1.46	0.48	0.11	0.00
Total	99.44	99.36	99.30	99.51	99.26	99.60	99.30

ID	BK-B	HA0409	HA0408	HA0411	HA0410	BE	YC
Rock Name	BTA	TA	TB	AB	TB	TB	AB
SiO ₂	51.78	59.03	49.18	51.17	50.05	51.26	50.47
TiO ₂	2.34	1.09	3.09	2.24	2.21	2.44	2.37
Al ₂ O ₃	15.74	17.07	16.26	16.09	17.49	15.78	16.29
MgO	4.79	1.47	4.66	4.85	5.47	4.82	4.95
FeO [†]	10.70	7.52	11.73	10.65	9.99	11.07	10.99
MnO	0.16	0.15	0.17	0.16	0.14	0.16	0.16
CaO	8.41	3.71	8.18	8.38	8.33	8.17	8.64
Na ₂ O	3.65	5.29	3.73	3.39	3.62	3.56	3.42
K ₂ O	1.48	3.57	1.45	1.41	1.60	1.47	1.16
P ₂ O ₅	0.45	0.37	0.75	0.43	0.55	0.47	0.45
LOI	0.00	0.16	0.12	0.85	0.21	0.40	0.72
Total	99.49	99.43	99.33	99.61	99.66	99.61	99.64

Total FeO as FeO[†]. Analyzed by XRF at Oregon State University Argon Geochronology Lab

Abbreviations: AB-Alkali basalt, TB-Trachybasalt, BTA-Basaltic trachyandesite, TA-Trachyandesite, T-Trachyte

에 분포하는 용암류와는 다른 시기에 분출된 용암류임을 지시한다.

HA0406(해발 872 m): 관음사 탐방로에서 탐라대 피소 약 2.5 km 떨어진 하천(한천) 계곡의 절개부를 따라 노출되어 있다(그림 6a). 수매의 아아 용암류 단위로 구성되며 특징적으로 사장석 반정이 우세하고, 단사휘석 반정도 산출한다. SiO₂ 50.2 wt%, Na₂O+K₂O 5.5 wt%로 조면현무암에 해당한다. 전암(석기)과 사장석 반정의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 각각 154.8±2.9

ka, 172.3±25.6 ka이다(그림 4, 5). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 보리악조면현무암으로 기재되었다.

K-01(해발 1536 m): 관음사 탐방로에서 삼각봉대 피소를 지나 용진각 계곡으로 가는 중간에 괴상으로 분포한다. 삼각봉 조면암체를 이루며 치밀질이고 절리면을 따라 용천수(샘)가 베어나온다. SiO₂ 64.0 wt%, Na₂O+K₂O 10.2 wt%로 조면암에 해당한다. 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 101.7±0.6 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으

Table 3. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of volcanic rocks at the studied area, Mt. Halla, Jeju Island.

ID	Material	Weighted Plateau					Normal Isochron					Inverse Isochron					Remark
		Age (ka)	2 s.d.	% ^{39}Ar	Steps ³	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	2 s.d	MSWD	Age (ka)	2 s.d.	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	2 s.d	MSWD	
BE	gm	27.9	3.5	94	25/33	0.54	28.2	5.1	295.29	1.50	0.61	28.3	4.8	295.30	1.50	0.61	IH
BK-B	gm	16.2	3.9	88	28/33	1.05	25.4	7.0	293.19	1.53	0.86	25.3	5.9	293.23	1.53	0.85	IH
HA0401	pl	92.5	34.8	23	6/21	0.65	78.6	43.0	300.56	11.39	0.65	82.6	39.4	300.52	11.37	0.60	IH
HA0401	gm	68.3	1.8	95	27/30	0.64	69.7	2.6	287.39	8.95	0.53	69.9	2.6	288.12	9.00	0.55	IH
HA0402	gm	69.4	1.5	100	33/33	0.61	71.8	4.2	292.55	4.77	0.57	71.9	4.2	292.52	4.76	0.58	IH
HA0403	af	50.1	6.2	94	19/20	92.38	23.1	17.7	352.73	81.60	0.00	51.6	8.2	288.69	47.19	90.51	TF
HA0404	gm	17.7	2.7	85	18/33	0.54	20.7	5.2	294.25	1.89	0.47	20.7	4.9	294.27	1.89	0.47	IH
HA0405	gm	133.6	0.9	100	28/28	0.95	133.0	2.1	296.58	4.75	0.98	133.0	2.0	296.83	4.75	0.98	IH
HA0406	gm	154.8	2.9	95	22/33	1.16	155.6	5.1	295.04	2.34	1.32	155.7	5.0	295.08	2.30	1.26	IH
HA0406	pl	172.3	25.6	89	20/24	1.17	173.3	31.6	291.66	7.40	0.92	185.3	31.4	291.23	8.09	1.20	IH
HA0407	gm	23.5	2.2	89	21/33	0.93	18.0	6.2	300.66	5.55	0.79	18.0	5.1	300.82	5.52	0.78	IH
HA0408	gm	168.3	2.7	94	23/33	1.01	170.8	3.9	290.18	5.64	0.95	170.8	3.9	290.80	5.65	0.92	IH
HA0408	pl	217.6	44.0	26	11/24	1.18	205.7	49.2	296.28	5.18	1.26	214.8	46.2	296.51	5.24	1.29	IH
HA0409	gm	53.5	1.6	100	33/33	0.38	55.9	3.1	286.48	9.80	0.28	55.7	3.1	287.67	9.83	0.31	IH
HA0410	gm	38.7	2.0	100	33/33	0.46	41.3	3.3	292.17	3.16	0.35	41.3	3.2	292.28	3.16	0.35	IH
HA0410	pl	79.4	16.2	74	13/24	0.79	78.5	30.0	291.85	24.41	0.72	82.0	25.2	293.24	24.96	0.87	IH
HA0411	gm	31.4	14.4	61	16/33	0.58	10.9	37.1	296.44	1.63	0.80	10.7	6.3	296.46	1.63	0.80	IH
HA0412	gm	27.0	1.1	100	32/32	1.46	26.2	3.2	296.50	4.90	1.50	26.2	3.0	296.78	4.90	1.50	IH
HA0413	gm	73.5	1.3	91	21/33	0.71	72.7	4.3	296.85	7.01	0.73	72.5	4.3	297.20	7.04	0.73	IH
HA0414	gm	135.8	0.8	69	22/32	0.97	136.5	1.1	290.50	5.03	0.89	136.5	1.1	291.01	5.04	0.86	IH
HA0415	gm	170.1	1.7	61	10/32	0.86	174.9	5.1	281.22	13.92	0.48	174.9	5.1	281.45	13.91	0.50	IH
K-01	gm	101.7	0.6	100	33/33	0.70	101.6	1.1	294.39	14.72	0.68	101.5	1.1	298.19	15.02	0.72	IH
K-04	gm	79.0	1.9	67	19/28	1.68	77.7	3.1	297.26	3.74	1.69	77.9	3.1	297.36	3.74	1.68	IH
YC	gm	29.7	3.7	100	31/32	0.49	29.4	4.6	292.64	0.93	0.52	29.7	4.4	292.64	0.93	0.53	IH

1. Samples irradiated at OSU TRIGA reactor for 6 hours at 1MW power. Neutron flux measured using FCT-3 biotite monitor (Renne *et al.*, 1998).

2. Plateau age includes % ^{39}Ar and number of steps in the plateau (steps in plateau / total steps).

Abbreviation: gm-groundmass, pl-plagioclase, af-alkali feldspar; IH-Incremental heating (Bulk Laser heating), TF-Total fusion

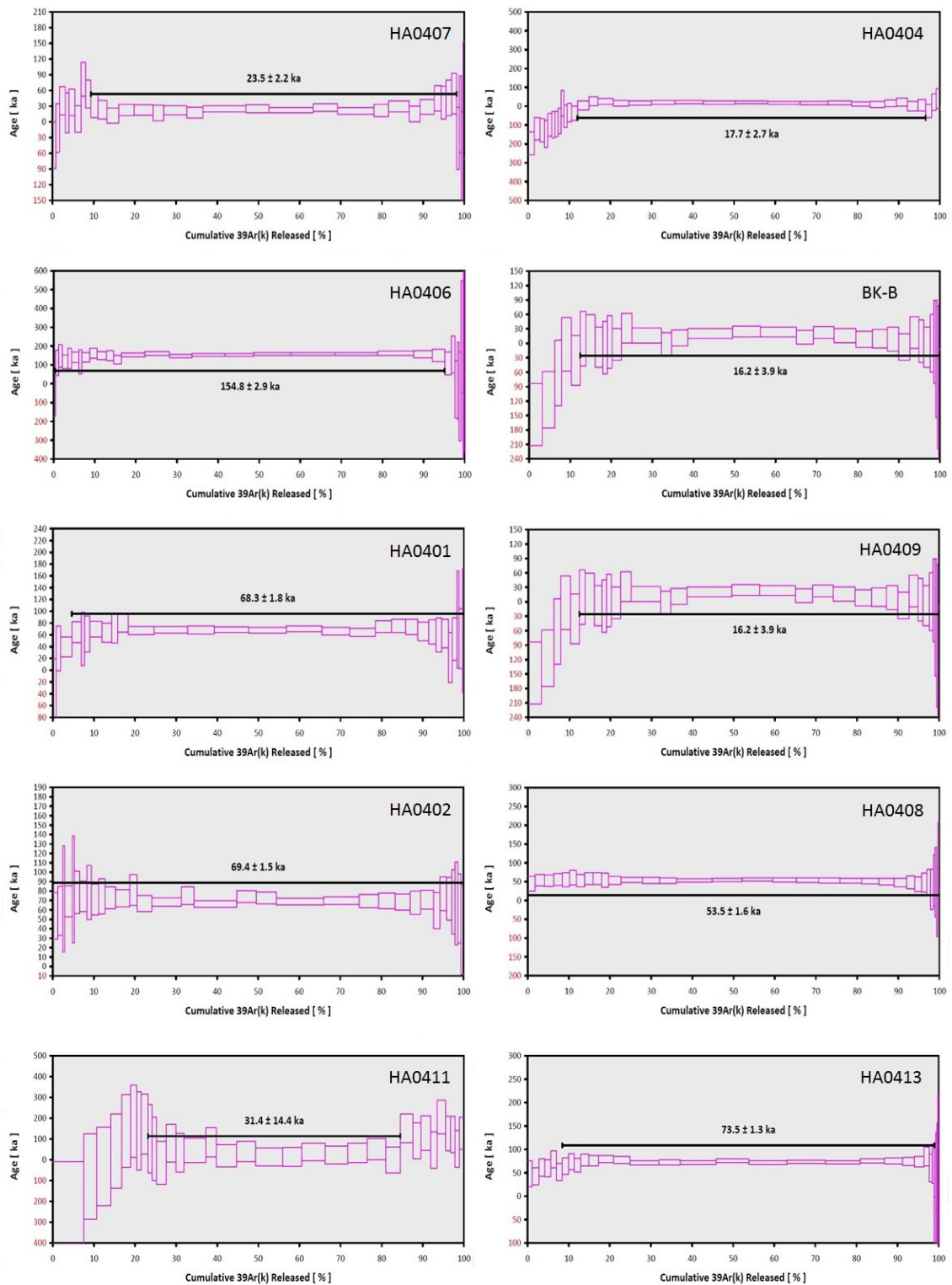


Fig. 4. ^{40}Ar - ^{39}Ar absolute age results of the whole rock (groundmass) samples from Mt. Halla, Jeju Island.

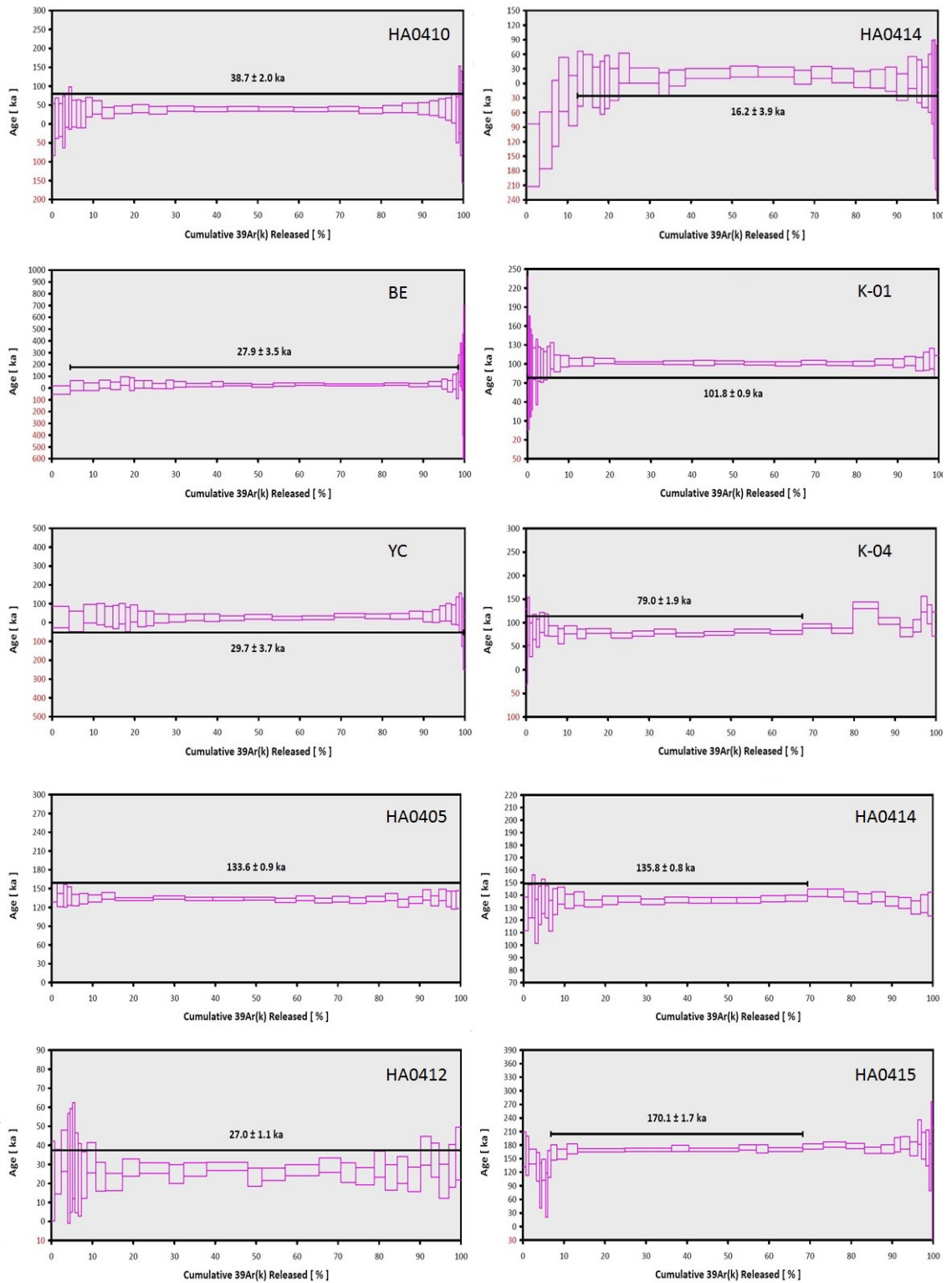


Fig. 4. continued.

로 기재되었다.

K-04(해발 1500 m): 용진각 계곡의 용진교 인근 한천 하상을 따라 테프라층을 관입한 암맥상(feeder dike로 해석됨)으로 1 m이내의 폭으로 약 30 m가량 노출되어 분포하며(그림 6b), 그 주변의 다른 암맥들과 암맥군을 이룬다. 치밀하며 반정의 사장석 결정이 다수 포함하는 반상 장석 현무암류의 특징을 지닌다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 79.0 ± 1.9 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

HA0401(해발 1710 m): 백록담 북벽과 가장 인접한 용진각 계곡내 한천 최상류 지역에서 하상 바다에 노출된 용암류이다. 비교적 치밀질이며 반상 감람석-사장석 조직을 지닌다. SiO_2 49.7 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 5.5 wt%로 조면현무암에 해당한다. 전암(석기)

과 사장석 반정의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 68.3 ± 1.8 ka, 92.5 ± 34.8 ka이다(그림 4, 5). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

HA0402(해발 1716 m): 한천 최상류 계곡일대에 하상 바다를 이루는 용암류와 주변의 테프라층을 관입하여 최대 2 m 두께의 암맥상을 이룬다. 비교적 치밀질이며 사장석 반정이 우세하고, 드물게 감람석 혹은 단사휘석을 반정으로 지닌다. SiO_2 59.5 wt%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 9.1 wt%로 조면안산암에 해당한다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 69.4 ± 1.5 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

HA0405(해발 1630 m): 관음사 탐방로변에 위치하며, 윗 부분이 평평한 반면 세 면의 가장자리는 절벽을 이루는 형태의 왕관릉은 조면암 돔이다. 노출

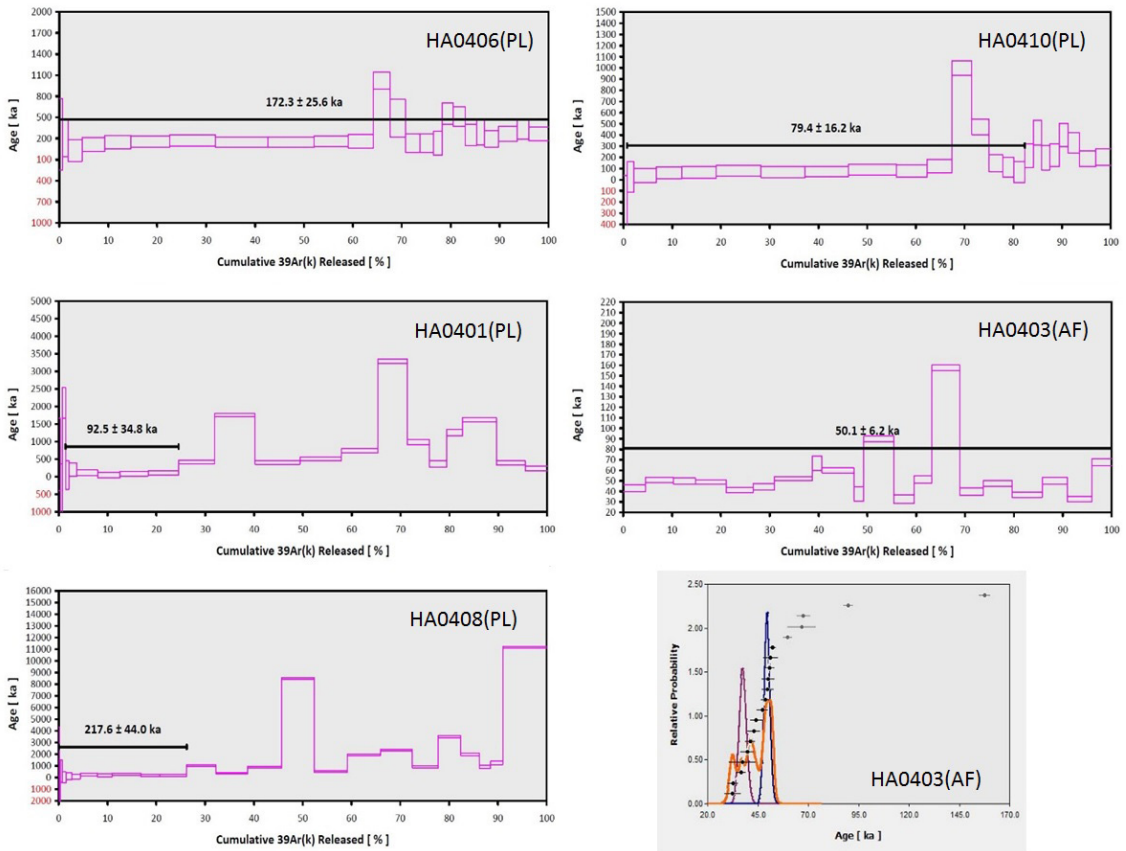


Fig. 5. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ absolute age results of phenocrysts of volcanic rocks from Mt. Halla, Jeju Island. Abbreviation: AF-alkali feldspar; PL-plagioclase. Sample (anorthoclase phenocrysts) of HA0403 has results of both total fusion age and ideogram.

된 노두는 비교적 풍화가 상당히 진전되어 있어 연대측정을 위한 시료 채취가 쉽지 않았다. 장석 반정이 우세한 반상조직을 띤다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 133.6 ± 0.9 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

HA0403(해발 1854 m): 백록담 분화구내 북쪽에서 1m 내외의 암괴상 블록으로 이루어진 테일러스 분포지에 해당한다. 알칼리장석(anorthoclase; Park, 1994)이 취반정으로 주를 이루며, 드물게 사장석 및 단사휘석이 반정 혹은 미반정을 이룬다. SiO_2 66.3 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 11.0 wt%로 조면암에 해당한다. 심한 풍화로 인해 전암시료의 연대측정은 실패하였으나, 알칼리장석 반정의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대(완전 용융법)는 50.1 ± 6.2 ka이다(그림 5). 한편, 7개의 입

자 각각의 분석결과는 최소 3~5만 년 전의 연대분포를 보인다. 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

HA0404(해발 1901 m)와 BK-B(해발 1891 m): 백록담 동쪽 능선부를 이루는 용암류로 다공질 파호이호이 용암류의 특징을 지니며 백록담 분화구의 동측 내부에서는 테프라층을 피복한다(그림 7). 용암류 단위의 상하는 다공질이나 중심부는 매우 치밀하며, 반상 감람석-사장석 조직을 지니는데, 사장석 반정은 주로 체(sieve)형을 이룬다. SiO_2 51.7~51.8 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.1~5.2 wt%로 현무암질 조면안산암에 해당한다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 17.7 ± 2.7 ka, 16.2 ± 3.9 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 백록담조면현무암으로 기재되었다.

HA0409(해발 1672 m): 장구목오름에서 삼각봉까지 능선을 이루는 테프라층 사이를 따라 북쪽으로 대상 띠를 이루어 분포하는 용암류이다. 다공질의 급랭 혹은 조면 조직을 지니며 감람석과 사장석은 산점 반상조직을 이룬다. SiO_2 59.0 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 8.9 wt%로 조면안산암에 해당한다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 53.5 ± 1.6 ka이다(그림 4). 한편 같은 용암단위에서 다른 부분 시료의 성분은 조면암에 해당한다(미발표자료). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

A0408(해발 1728 m): 윗세오름대피소에서 백록담 북벽 탐방로 주변 하천의 하상에 테프라층과 조면암질 애추층 사이에 1~2 m 두께로 소규모 노출되어 있다. 치밀질이며, 반상 감람석-사장석 조직을 이룬다. SiO_2 49.2 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.2 wt%로 조면현무암에 해당한다. 전암(석기)과 사장석 반정의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 각각 168.3 ± 2.7 ka, 217.6 ± 44.0 ka이다



Fig. 6. Field photograph showing (a) layered Aa lava flows at valley cut near Tamra Shelter, and (b) basaltic dike intruding into tephra layer near Yongjin Bridge. The samples H0406 and K-04 were collected from each unit.

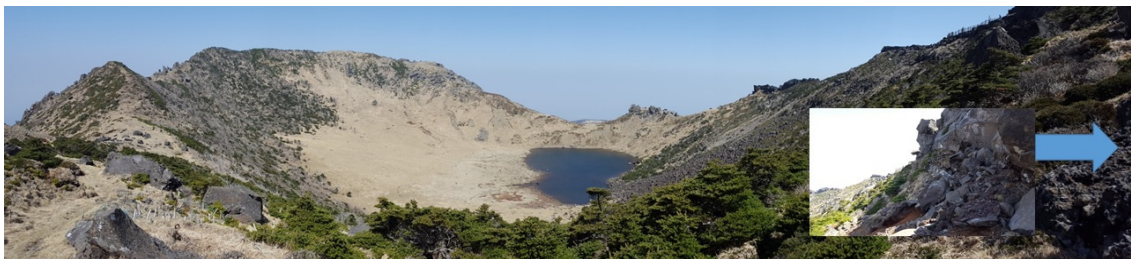


Fig. 7. Field photograph showing lava flows covering the eastern part of Baengrokdam (with enlarged photo). The samples H0404 and BK-B were collected from these lava flows. Tephra layer (brown color in enlarged photo) is overlaid with lava flow.

(그림 4, 5). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 만세동산역암으로 기재되었다.

HA0411과 HA0412(해발 1720 m): 윗세오름대피소에서 돈내코 탐방로 쪽으로 약 1 km 떨어진 지점에 백록담 조면암돔에 인접하여, 소규모 화산체(무명오름, 해발 1725 m)가 위치해 있는데, 용암류가 정상부에 분포하여 용암구의 형태를 이룬다(그림 8a). 드물게 직경 30 cm 크기의 조면암역을 포획하고 있으며, 비교적 얇은 두께를 지니는 복합용암류를 이룬다(그림 8b). 포획된 조면암역의 외각부분은 국지적으로 부분용융된 특징을 지닌다. 용암류는 급랭에 의한 유리질의 석기를 이루며, 침상의 사장석 결정이 우세한 장석 현무암류의 특징을 지닌다. SiO₂ 51.2 wt%, Na₂O+K₂O 4.8 wt%로 알칼리현무암에 해당한다. 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 각각 31.4±14.4ka, 27.0±1.1 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 만세동산역암으로 기재되었다.

HA0410(해발 1614 m): 윗세오름 대피소에서 돈내코 탐방로로 가는 코스 남쪽에 위치한 백록샘 용천수로 부터 약 600 m 떨어진 하천(동홍천 최상류) 바닥에 노출된 용암류로서 파호이호이 용암류와 아아 용암류 단위가 서로 중복되어 유동된 산상을 지닌다. 비교적 치밀하며, 다공질의 반상 단사휘석-사장석 조직을 지닌다. SiO₂ 50.1 wt%, Na₂O+K₂O 5.2 wt%로 조면현무암에 해당한다. 전암(석기)과 사장석 반정의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 각각 38.7±2.0 ka, 79.4±16.2 ka이다(그림 4, 5). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에

서는 백록담조면현무암으로 기재되었다.

BE(해발 1642 m): 방애오름 동쪽 남벽분기점 부근 돈내코 탐방로변에 노출되어 있는 용암류로 비교적 다공질이며 침상 혹은 체형의 사장석 반정이 특징적이다. SiO₂ 51.3 wt%, Na₂O+K₂O 5.0 wt%로 조면현무암에 해당한다. 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 27.9±3.5 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 윗세오름조면현무암(분석구)으로 기재되었다.

YC(해발 153 2m): 돈내코 탐방로 중 알방애오름 우측에 해당하는 하천(영천 최상류)의 주변에 노출되어 있는 용암류로서 다공질이며 침상 혹은 체형을 한 사장석 반정이 특징적이다. SiO₂ 50.5 wt%, Na₂O+K₂O 4.6 wt%로 알칼리현무암에 해당한다. 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 29.7±3.7 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 백록담조면현무암으로 기재되었다.

HA0413(해발 1602 m): 영실 탐방로 중 병풍바위 최상부를 피복하고 암괴상 블록의 형태로 분포하는 다공질 아아 용암류로서, 반상 감람석-사장석 조직을 띤다. 암상 특징과 주변의 지질을 고려할때 윗세죽은오름이 분화구일 가능성이 높다. SiO₂ 52.6 wt%, Na₂O+K₂O 6.6 wt%로 현무암질 조면안산암에 해당한다(미발표자료, 홍세선). 전암(석기)의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 절대연대는 73.5±1.3 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 법정동조면현무암으로 기재되었다.

HA0415(해발 1500 m): 영실 탐방로옆 병풍바위



Fig. 8. Field photograph showing (a) unnamed hill-1725, lava cone (red arrow) and (b) basaltic lava flows with trachyte xenolith. The samples HA0411 and HA0412 were collected from these lava flows.

를 이루는 조면암(그림 9a)에 주먹 정도 크기의 암괴 형태로 포획되어 분포한다(그림 9b). 산발적인 기공을 지닌 장석 현무암류의 특징을 지닌다. 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 170.1 ± 1.7 ka이다(그림 4).

HA0414(해발 1299 m): 영실 탐방로 초입부에 암반으로 노출되어 분포하는데, 치밀질이며, 사장석 결정이 반정 및 미반정으로 우세하다. SiO_2 60.6 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 10.6 wt%로 조면암에 해당한다(Park, 1994). 전암(석기)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 135.8 ± 0.8 ka이다(그림 4). 기존 도폭(Park *et al.*, 2000)에서는 한라산조면암으로 기재되었다.

4. 토 의

우선, 이번 획득된 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대는 시료의 신중한 선택이 연대 자료의 신뢰를 높이는데 얼마나 중요한 지를 알려준다. 한라산 정상부에 분포하는 조면암인 경우 노출된 부분이 대부분 상당히 풍화가 진행되어 신선한 노두를 발견하기가 매우 힘들다. 따라서 노두의 선택과 시료 채취에 상당히 주의하였다. 또한 반상 조질을 지닌 용암류의 경우 사장석 결정 내에 포함된 상당한 과잉 아르곤으로 인해 반정을 주의깊게 구분하지 않고 전암 연대를 측정할 경우 원래보다 오래된 연대값을 얻게 된다는 점을 알수 있다(그림 4, 5). 현무암질 용암류내 사장석 반정의 연대와 석기 부분의 전암 연대 차이는 지표로 분출된 마그마가 화산활동이 일어나기 전 상당 기간 동안 마그

마방을 유지하고 있었음을 미루어 짐작할 수 있다.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 의하면 한라산 고지대의 화산활동은 1) 약 17만년 동안 지속되어왔으며 2) 크게 2회의 화산활동기, 즉 18.2 ~ 10만 년 전과 9.5~1.4만 년 전으로 구분된다(그림 10).

18.2 ~ 10만 년 전의 화산활동은 현무암질과 조면암질 용암류 모두의 분출 기록을 지닌다. 현무암질 용암류는 백록담 조면암 돔 서쪽 하천 침식지의 바닥(HA0408) 혹은 북쪽 관음사 탐방로의 탐라대피소 인근 계곡(HA0406)에 분포하고 이후에 분출한 영실 조면암내에 포획(HA0415)되어 산출한다. 한편 조면암질 용암류는 어리목 Y계곡의 하천 침식지(YVA)에 암맥상으로 노출되어 분포가 확인되며, 영실(HA0414)과 왕관릉(HA0405)과 같은 용암 돔을 형성하였다. 이러한 결과는 이 시기 동안 주로 한라산 중심부의 주화산분화구(백록담 형성 이전)로부터 현무암질 용암의 분출이 있었고, 분화구 주변으로 독립하여 조면암질 용암류가 암맥 혹은 돔을 이루었을 가능성을 지시한다. 또한 오늘날 장구목 북서쪽 무수천 최상류 지역에 절벽 지형을 이루고 있는 조면암도 이 시기 동안에 형성되었을 가능성이 있다. 이 기간의 가장 마지막 화산활동은 삼각봉 조면암 돔(K-01)의 형성이다.

9.5~1.4만 년 전의 화산활동은 한라산 주화산체 분화구 주변에서의 현무암질 및 조면암질 용암류의 관입(feeder dike) 및 분출, 그리고 조면암 돔(백록담)의 형성과 최후 백록담 정상부의 현무암질 용암류의 분출로 종료된다. 현무암질 용암류는 백록담 조면암

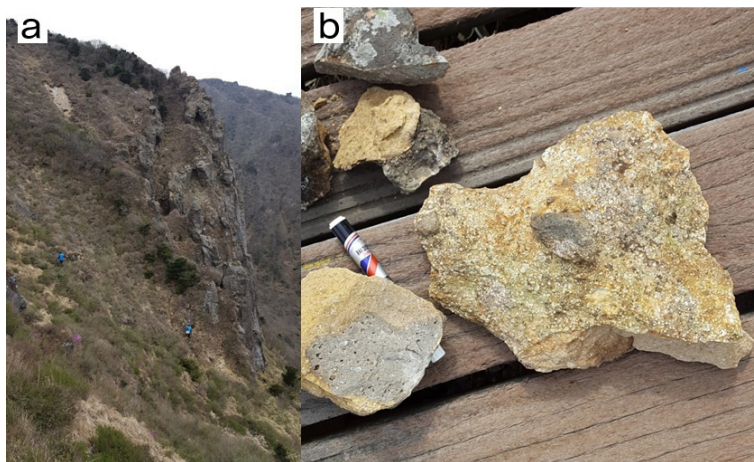


Fig. 9. Field photograph showing (a) trachyte cliff at Yeongsil and (b) basaltic lava xenolith. The sample HA0415 was collected from this xenolith.

돔 북쪽 용진각 계곡 최상류 하천 바닥(HA0401) 혹은 암맥상(K-04, HA0402)으로 분포하거나, 영실탐방로 중 병풍바위 상부 윗세죽은오름 일대(HA0413)에 분포한다. 그리고 유사한 시기의 현무암질 용암류는 한라산 정상에서 남남동쪽으로 약 8 km 떨어진 돈내코 계곡 하천변(전암 석기 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 75.3 ± 2.5 ka; 미발표자료, 고기원), 북동쪽으로 약 10 km 떨어진 물장울고 인근 하천변(전암 석기 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 56.4 ± 3.0 ka; 미발표자료, 고기원)에도 분포한다. 한편, 백록담 조면암 돔 북쪽 용진각 계곡 양쪽으로 우측은 왕관릉 방향으로 좌측은 삼각봉 방향으로 띠 모양의 실(sill)을 이루어 조면암류(HA0409)가 분포하는데(그림 11), 그 시기는 현무암질 용암류보다 젊은 약 5만 2천 년에 해당한다. 특히, 5만 년~1만 4천 년 전의 화산활동은 주 분화구에서의 백록담 조면암 돔 형성기, 주 분화구 주변 단성 화산체로부터 현무암질 용암류의 분출 및 백록담 동릉으로 최후의 용암 분출 기록을 지시한다. 지표에 노출된 백록담 조면암은 석기 부분의 풍화 정도가 매우 심한데, 이번 연구에서도 이로 인해 전암 연대를 얻는데 실패하였다. 선별된 알칼리장석 반정 결정으로부터 50.1 ± 6.2 ka의 연대(완전 용융법)를 보고하지만, 7개의 입자 각각의 분석결과는 최소 3~5만 년 전의 연대분포를 보이고 있음을 고려하면 조면암의 분출은 3만 년 전보다

이후 일 것으로 판단된다. 이 연대는 Ahn and Hong (2017)에 의해 보고한 알칼리장석 반정의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 0.032 ± 0.010 Ma에 유사하나, Won *et al.* (1986)에 의해 보고된 K-Ar 전암 연대, 0.025 ± 0.008 Ma를 재현하지 못하였다. 향후 백록담 조면암을 대상으로 신뢰할만 한 전암 연대를 획득하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 윗세오름 남쪽 하천 침식 지역에 분포하는 용암류의 상부는 퇴적층 혹은 조면암질 각력암층에 의해 피복되는데, 최근 얻어진 퇴적층의 광여기루미네선스 연대는 37.6 ± 3.2 ka~ 41.3 ± 3.1 ka 이다(Ahn and Hong, 2018). 각력의 조성은 유문암에 해당(미발표자료, 홍세선)하는데, 이번 연구 결과는 현재 백록담 조면암 돔이 상기한 조면암질 각력암층의 공급원이 아닐 가능성을 지시하며, 이들의 기원에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다. 한편, 백록담 조면암 돔 형성 이후의 화산활동은 주로 주변의 소화산체를 중심으로 이루어졌으며, 이때 분출된 현무암질 용암류는 백록담 조면암 돔 남쪽 1725 m 무명오름 일대(HA0411, HA0412), 윗세오름 남쪽 하천 침식 지역(HA0410), 방에오름-알방에오름 우측 지역(BE, YC), 관음사 탐방로 구린굴 일대(HA0407)에 분포한다. 한라산 동릉 정상부에 분포하는 현무암질 조면안산암 조성의 용암류로부터 분석된 두개 시료(BK-B, HA0404)의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대가 각각

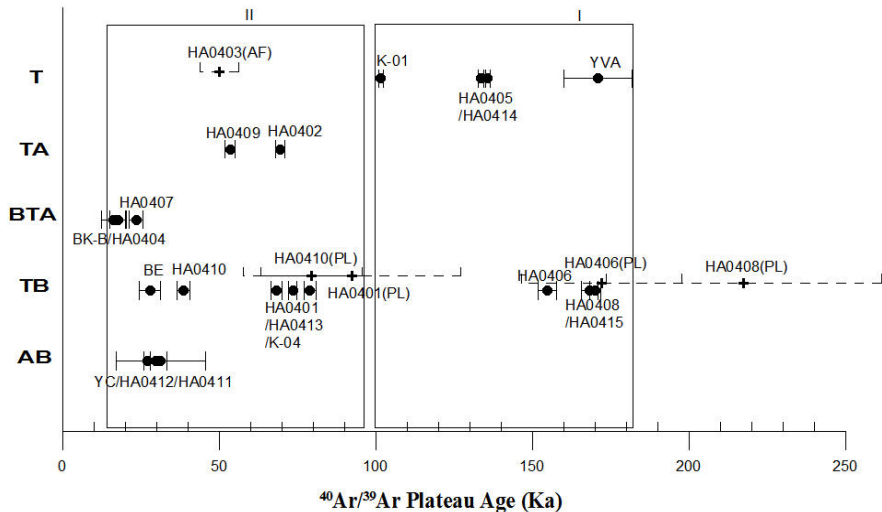


Fig. 10. ^{40}Ar - ^{39}Ar absolute ages (with 2 SD) vs. volcanic rock types from Mt. Halla, Jeju Island. The ages of whole rock (groundmass) and phenocryst are represented by solid and dashed lines, respectively. The solid box indicates range of each volcanic episode, I and II. Abbreviation: AB-alkali basalt, TB-trachybasalt, BTA-basaltic trachyandesite, TA-trachyandesite and T-trachyte in composition; AF-alkali feldspar; PL-plagioclase.

17.7±2.7 ka와 16.2±3.9 ka로서, 비교적 재현가능하고 신뢰할 만한 연대를 제시해주고 있다고 판단된다. 따라서 한라산 정상부는 백록담 조면암 돔이 형성된 이후 돔의 남쪽과 북쪽으로 지속적인 현무암질 마그마에 의한 화산활동이 있었으며, 이때 1725 m 무명오름, 방애오름-알방애오름 등이 만들어졌고, 최종적으로 정상 분화구로부터 동쪽으로 용암류의 용출을 일으킨 최후 화산활동은 약 2만 년 전에서 약 1만 4천 년 전에 해당한다. 이는 그 하부의 퇴적층에서 얻어진 광여기루미네선스 연대, 21±4 ka~23±4 ka (Ahn and Hong, 2017)와도 부합한다.

5. 결론

한라산 고지대 중 관음사, 영실, 돈내코 탐방로 주변의 하천 계곡, 장구목 정상 일대 및 한천의 최상류인 용진각 계곡 등지에서 채취한 20개의 용암류에 대해 전암 주성분자료를 포함한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대를 보고하고 이 지역의 화산활동사를 제시한다.

용암류의 조성은 SiO_2 49.2~66.3 wt%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.6~11.0 wt%로서 알칼리현무암-조면현무암-현무암질조면안산암-조면안산암-조면암에 해당한다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대에 의하면 한라산 고지대의 화산활동은 1) 약 17만 년 동안 지속되어왔으며, 2) 크게 2회의 화산활동기, 즉 18.2~10만 년 전과 9.5~1.4만 년 전으로 구분된다. 최후 화산활동은 정상 분화구로부터 동쪽으로 현무암질 조면안산암 조성의 용암류를 유출시켰으며, 그 시기는 약 2만 년 전에서 약 1만 4천 년 전에 해당한다. 이번 연구 결과는 한라산 백록담 및 그 주변 지역에 분포하는 용암류에 대한 절대연대 자료가 상당 부분 확보되어 용암류들간의 선후관계

해석이 가능해졌을 뿐 아니라, 한라산 정상부 지역은 2만 5천 년 전의 화산활동으로 형성되었다는 이전 연구결과는 수정되어야 한다는 점이 확인되었다. 또한 한라산 고지대 지역은 알려진 것처럼 백록담 위주로 한 중심분출로 형성된 것이 아니라, 백록담 분화구 및 그 주변 분화구를 통해 약 18만 2천 년 전부터 약 1만 4천 년 전까지 오랜시간 동안 지속된 화산활동에 의해 만들어졌음을 제시한다.

끝으로 본 연구를 포함하여 최근 제시되는 연구 결과는 한라산에 분포하는 용암류의 층서와 명명에 대한 기존의 연구 결과들이 재고되어야 함을 시사한다. 또한 향후 한라산 서북부의 장구목 계곡 일대, 남부의 효돈천 상류, 돈내코 및 입석 지역 등지의 지질 조사와 체계적인 연대측정을 포함한 많은 연구가 지속적으로 요구된다. 더불어 제주도 한라산 하부의 지질 및 화산활동사를 정확히 밝히기 위해 정상부 인근에서 심부 시추를 통한 연구를 제안한다.

감사의 글

이 연구의 기본 자료인 Ar-Ar 연대측정에 애를 써주시고 분석 결과를 함께 논의해 준 오레곤 주립대학교 Dr. Daniel P. Miggins, Dr. Anthony Koppers, Dr. Robert Duncan께 깊은 감사를 드립니다. 현장 조사 및 토론에 함께 해 준 제주특별자치도 세계유산본부 전문문 박사와 안웅산 박사께 감사를 드립니다. 논문의 초고에 세심한 심사를 해주신 기초과학지원연구원의 김정민 박사님과 부산대학교 윤성효 교수님께 감사를 드립니다. 이 연구는 제주특별자치도 개발공사의 자체 연구 사업과 문화재청이 출연하여 세계유산본부가 지원하고 한국지질자원연구원이

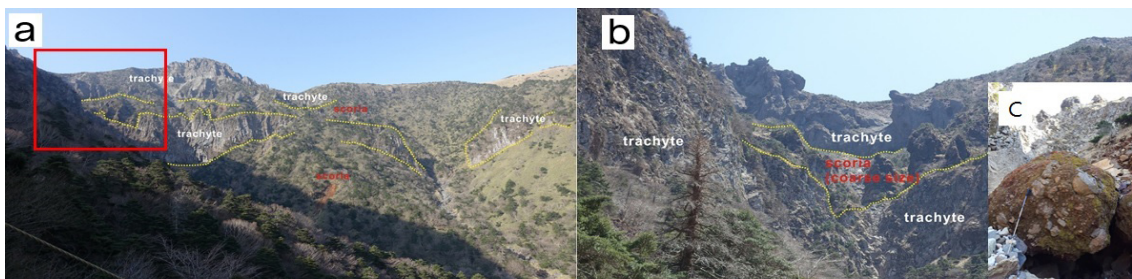


Fig. 11. Field photograph showing (a) sill-type extrusion of trachyte (dashed lines) along the northern cliff of Baengnokdam at the northern end of Yongjingak valley, (b) enlarged photo and (c) agglomerate block from scoria layer rolled onto the valley.

수행하는 “한라산 천연보호구역 지형, 식생, 기후 기초학술조사(연구책임자: 임재수)”에 의해 이루어졌다.

REFERENCES

- Ahn, U.S. and Hong, S.S., 2017, Volcanological History of the Baengnokdam Summit Crater Area, Mt. Halla in Jeju Island, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 26, 221-234 (in Korean with English abstract).
- Ashwell, P.A., Kennedy, B.M., Edwards, M. and Cole, J.W., 2018, Characteristics and consequences of lava dome collapse at Ruawahia, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 80, 43, doi: 10.1007/s00445-018-1217-1.
- Barmin, A., Melink, O. and Sparks, R.S.J., 2002, Periodic behavior in lava dome eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 199, 173-184.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Kerszturi, G., Sohn, Y.K., Smith, Ian E.M. and Wijbrans, J., 2015, Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju, Republic of Korea. *Bulletin of Volcanology*, v. 77, 7, doi: 10.1007/s00445-014-0896-5.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Németh, K., Smith, I.E.M. and Sohn, Y.K., 2011, The influence of magma plumbing complexity on monogenetic eruptions, Jeju Island, Korea. *Terra Nova*, 23, 70-75.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Maas, R. and Sohn, Y.K., 2012a, How small-volume basaltic magmatic systems develop: a case study from the Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Journal of Petrology*, 53, 985-1018.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012b, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337-352.
- Environmental Resources Institute, 2009, The natural resources in Mt. Hallasan. Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, 347 p (in Korean).
- Gertisser, R., Charbonnier, S.J., Keller, J. and Quidelleur, X., 2012, The geological evolution of Merapi volcano, Central Java, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 74, 1213-1233.
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.R., Kim, G.O. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Kang, S.S., 2003, Petrology of the volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. *Journal of Petrological Society of Korea*, 12, 1-15 (in Korean with English abstract).
- Koppers, A.A., 2002, ArArCALC software for ^{40}Ar - ^{39}Ar calculations. *Computers & Geosciences*, 28, 605-619.
- Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sørensen, H. and Woolley, A.R., 2002, Igneous rocks: A classification and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. 2nd Edition. Cambridge University Press, 236 p.
- Macdonald, G.A. and Katsura, T., 1964, Chemical composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77, 19-26.
- Miyake, Y., Furuyama, K., Yoon, S., Koh, G.W. and Nagao, K., 1993, Temporal chemical variation of Pleistocene volcanic rocks from Jeju Island, Korea. In Geological correlation of southwest Japan and Korea Peninsula-tectonics for spreading of active continental margin. Science Report of Shimane Univ., 106-111 (in Japanese).
- Ogburn, S.E., Loughlin, S.C. and Calder, E.S., 2015, The association of lava dome growth with major explosive activity ($\text{VEI} \geq 4$): DomeHaz, a global dataset. *Bulletin of Volcanology*, 77: 40, doi: 10.1007/s00445-015-0919-x.
- Park, J.B., 1994, Geochemical evolution of the Cheju Volcanic Island, Korea. Yonsei Univ. Doctoral Thesis, 303 p (in Korean with English abstract).
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.-C., Cho, B.-W., Jang, Y.N., Lee, B.-J., Lee, S.-R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000, Geologic report of the Segwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p (in Korean with English abstract).
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 41, 527-537 (in Japanese with English abstract).
- van Wyke de Varies, B., Marquez, A., Herrera, R., Granja Bruna, J.L., Llanes, P. and Delcamp, A., 2014, Craters of elevation revisited: forced-folds, bulging and uplift of volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 76, 875, doi: 10.1007/s00445-014-0875-x.
- Won, C.K., Matsuda, J., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W., 1986, Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Jeju Island, Korea. *Journal of Korean Institute Mining Geology*, 19, 25-33.
- Yoon, S., Hyun, W.H. and Jung, C.Y., 2005, Geology of Hallasan (Mt. Halla), Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 481-497 (in Korean with English abstract).

Received : August 18, 2018

Revised : October 13, 2018

Accepted : October 17, 2018